

# Modellierung von Einflüssen der Aufbau- und Verbindungstechnik auf die Genauigkeit und Langzeitstabilität von Hallensoren

Sebastian Fischer\*, Thomas Fellner\*, Harald Beyer\*\*, Ralf Janke\*\*, Jürgen Wilde\*,  
 \* IMTEK, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg; \*\*Micronas GmbH, Freiburg

## Kurzfassung

Das Ausgangssignal kunststoffverkapselter Hallensoren zeigt eine Abhängigkeit von mechanischer Spannung und Temperatur in Bezug auf Empfindlichkeit und Offset. Mechanische Spannungen im Gehäuse entstehen bei Temperaturänderungen aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Gehäusematerialien. Die Spannungen in der magnetfeldempfindlichen Schicht des Sensors wirken über den Piezo-Halleffekt sowie den piezoresistiven Effekt auf das Ausgangssignal. In dieser Arbeit wird dargestellt, wie sich mechanische Spannungen und Temperatur auf die Empfindlichkeit von Hallensoren auswirken. Die thermomechanischen Spannungen die in der Sensorschicht während des Montage- und Häusungsprozesses auftreten wurden mittels FE-Methode analysiert. Dabei wurden nichtlineare, zeitabhängige Materialeigenschaften berücksichtigt. Die durchgeführten FE-Simulationen wurden mittels Röntgen-Verformungsmessungen verifiziert.

## 1. Einleitung

Hallensoren finden vielfältigen Einsatz in den unterschiedlichsten Bereichen. Sie dienen zur Positionserkennung, Drehrichtungs- oder Drehwinkelbestimmung etc.

In Halbleiter-Hallensoren dient im Allgemeinen eine piezoresistive Schicht als Hallsensor. Die Piezoeigenschaften dieser Schicht führen zu einer starken Abhängigkeit des Hallensensors von Temperatur und mechanischer Spannung. Der Zusammenhang zwischen dem elektrischem Feld  $\vec{E}$ , der Stromdichte  $\vec{J}$  und der magnetischen Flussdichte  $\vec{B}$  kann für einen kubischen Kristall wie Silizium wie folgt dargestellt werden, [1]:

$$\vec{E} = \rho \vec{J} - (R_H \vec{B}) \times \vec{J} \text{ für } \vec{B} \perp \vec{E} \quad (1)$$

mit dem Hallkoeffizienten  $R_H$  und dem spezifischen elektrischen Widerstand  $\rho$ . Beide Koeffizienten zeigen eine Abhängigkeit von der mechanischen Spannung. Ihre relativen Änderungen sind wie folgt definiert:

$$\frac{\Delta \rho_{ij}}{\rho_0} = \sum_{kl} \pi_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (2)$$

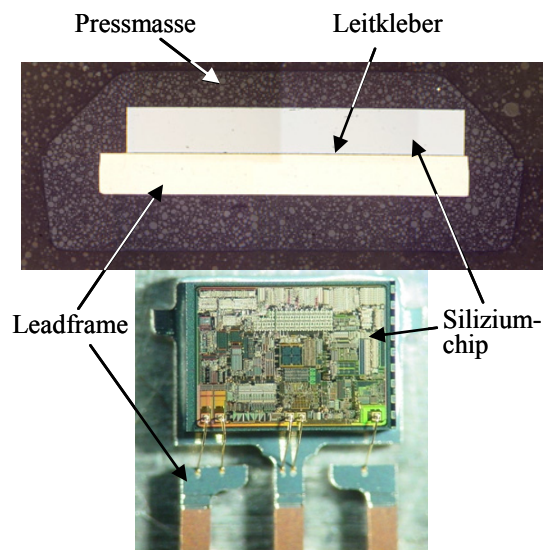
und

$$\frac{\Delta R_{ij}}{R_0} = \sum_{kl} P_{ijkl} \sigma_{kl} \quad (3)$$

mit dem Tensor der mechanischen Spannung  $\sigma_{kl}$ .  $\pi_{ijkl}$  und  $P_{ijkl}$  sind die Tensoren der piezoresistiven bzw. der Piezo-Hall Koeffizienten. Mechanische Spannungen können somit die Offsetspannung wie auch die Empfindlichkeit von Hallensoren beeinflussen.

## 2. Aufbau- und Verbindungstechnik von Hallensoren

Ein typischer Hallensensor besteht aus dem Siliziumchip, der mittels Silberleitkleber auf das Leadframe geklebt und danach mit einer Epoxid-Pressmasse verpresst wird. Bild 1 zeigt den Querschnitt sowie die Draufsicht eines leadframebasierten Gehäuses (Durchsteckgehäuse PTO92). In der obersten Schicht des Siliziumchips befindet sich der magnetfeldempfindliche Bereich.



**Bild 1:** Schlichtbild und Draufsicht eines Hallensensors im Durchsteckgehäuse

Anhand von Bauteilzeichnungen sowie Schlichtbildern wurde zunächst die Geometrie des Bauteils in ein parametrisches FE-Modell umgesetzt, [6].

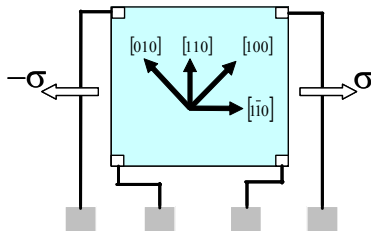
### 3. Mechanische Abhängigkeit der Sensorempfindlichkeit

Zur Bestimmung der Abhängigkeit des Ausgangssignals einer Hallplatte von Temperatur, mechanischer Spannung und Magnetfeld wurden halbleitende Hallplatten ohne einen integrierten Auswerteschaltkreis untersucht.

#### 3.1 Versuchsaufbau und Messplan

Mit einem speziell konstruierten Messplatz ist es möglich Hallsensoren im ungehäuseten Zustand überlagert mit einer mechanischen Spannung bis 120 ( $\pm 0,4$ ) MPa, einem homogenen Magnetfeld zwischen -30 mT bis 30 mT sowie Temperaturen zwischen -40 °C und 150 °C zu beaufschlagen. Die Temperatur wurde direkt an der Probe mittels Pt 100 gemessen. Die Konstruktion vermeidet insbesondere Scher- und Torsionskräfte. Eine vom Sensor mechanisch entkoppelte Platine dient als Schnittstelle zu den Messgeräten.

Für die Messung wurde ein n-dotierter, quadratischer Sensor mit quadratischer Kontaktierung verwendet. Die Größe der Hallplatten beträgt 100 x 100  $\mu\text{m}^2$ . Die mechanische Spannung wirkt entlang der  $[110]$ -Richtung, der Strom  $I$  fließt entlang einer  $\langle 100 \rangle$ -Richtung, Bild 2. Die Hallspannung steht entsprechend senkrecht zur Stromrichtung.



**Bild 2:** Kristallrichtungen der Hallplatte sowie Richtung der zur Messung aufgebracht mechanischen Spannung

Die Datenerfassung erfolgt automatisiert mit Hilfe von LabView. Um aussagekräftige Werte der Empfindlichkeit zu erhalten, wurde die Hallspannung bei fünf Magnetfeldstärken gemessen.

#### 3.2 Ergebnisse

Mechanische Spannungen bewirken eine Veränderung des Offsetsignals sowie der Empfindlichkeit von Hallsensoren, [8]. Die folgenden Betrachtungen beziehen sich auf die Abhängigkeit der magnetischen Empfindlichkeit von der mechanischen Spannung.

Bei konstanten Umgebungsbedingungen ergibt sich ein linearer Verlauf zwischen Hallspannung und Magnetfeld. Die Steigung der Geraden entspricht der magnetischen Empfindlichkeit  $\eta$  des Hallsensors. Diese

wurde für mechanische Spannungen zwischen 10 und 100 MPa sowie Temperaturen zwischen -40 °C und 125 °C bestimmt.

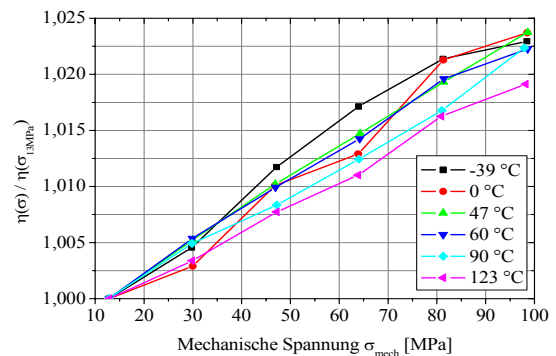
Die magnetische Empfindlichkeit der Hallsensoren hängt von den entlang der Stromflussrichtung wirkenden Normalspannungen  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\sigma_z$  ab. Mechanische Spannungen normal zur Hallplattenebene werden bei den folgenden Betrachtungen vernachlässigt. Aus den theoretischen Grundlagen folgt für den Zusammenhang zwischen der mechanischen Spannung und der magnetischen Empfindlichkeit  $\eta$ :

$$\eta = \frac{dU_H}{dB} = -R_0 \cdot \frac{I}{d} \cdot [1 + P_{12} \cdot (\sigma_x + \sigma_y)] \quad (5)$$

Dabei ist  $I$  der Strom durch die Hallplatte und  $d$  die Dicke der Hallplatte.  $R_0$  und  $P_{12}$  entsprechen dem Hallwiderstand sowie dem Piezo-Hall Koeffizienten. Bei den durchgeführten Versuchen wurde die Hallplatte uniaxial belastet, damit ergibt sich:

$$\eta \propto (P_{12} \cdot \sigma) \quad (6)$$

Bild 3 zeigt die normierte Empfindlichkeit in Abhängigkeit von der mechanischen Spannung und der Temperatur. Bei uniaxialer Zugbelastung steigt die magnetische Empfindlichkeit der Hallplatten demnach um ca. 2,2 % bei einer Spannung von 100 MPa. Aus den Messwerten lässt sich der Piezo-Hall Koeffizient  $P_{12}$  berechnen. Bei 25 °C wurde ein Piezo-Hall Koeffizient von  $31,5 \cdot 10^{-11} \text{ Pa}^{-1}$  gemessen. Der gemessene Temperaturkoeffizient liegt bei  $\alpha_p = -1300 \text{ ppm K}^{-1}$ . Diese Werte stimmen unter Berücksichtigung der Dotier- und Temperaturabhängigkeit gut mit theoretischen Werten überein, [1].



**Bild 3:** Abhängigkeit der Empfindlichkeit (normiert) von der mechanischen Spannung für verschiedene Temperaturen

### 4. Simulation des AVT-Prozesses

Während der Montage und der Häusung der Sensoren sind die Bauteile starken Temperaturschwankungen unterworfen. Aufgrund der unterschiedlichen thermischen Ausdehnungskoeffizienten der Materialien

führt dies zu hohen mechanischen Spannungen im Bauteil.

In aufwendigen Materialuntersuchungen wurden die Materialparameter für das temperaturabhängige elastische, viskoelastische und viskoplastische Materialverhalten von Klebstoffen und Pressmassen ermittelt und jeweils in der Simulation berücksichtigt, [2, 3, 4, 5, 6]. Außerdem wurde der temperaturabhängige Elastizitätstensor für Silizium in der Simulation berücksichtigt, das Leadframe wurde linear-elastisch modelliert. Bild 4 zeigt einen typischen Temperaturverlauf während des AVT-Prozesses von verpressten Sensoren.

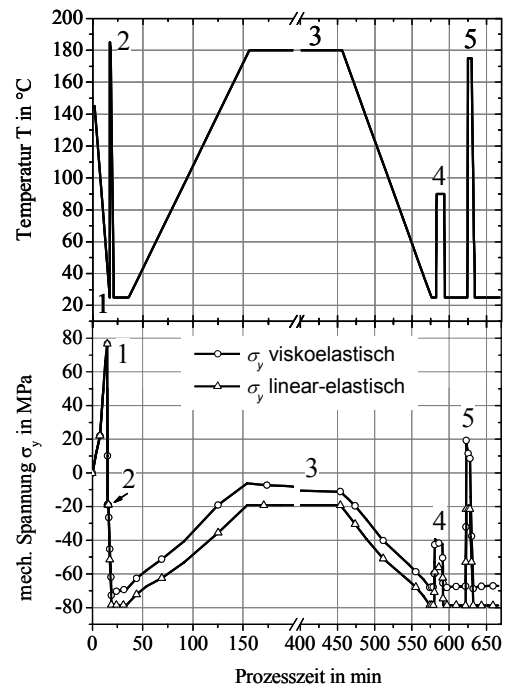
Zunächst wird der Sensorchip auf das Leadframe geklebt und bei etwa 145 °C ausgehärtet (Bild 4, links). Danach erfolgt das Verpressen des Aufbaus bei 180 °C. Der Aushärtevorgang für die Pressmasse erfolgt ebenfalls bei 180 °C (3). Daran schließt sich ein Galvanikschritt sowie ein Endtest an.

Während des Aushärtevorgangs des Klebers ist der Aufbau spannungsfrei. Bei der sich anschließenden Abkühlung steigt der Elastizitätsmodul des Klebers. Somit kommt es aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Leadframe und Silizium zur Verformung des Aufbaus und damit zu mechanischen Spannungen in der empfindlichen Sensorschicht. Dieser Effekt wird besonders nach dem Unterschreiten der Glasübergangstemperatur des Klebers von etwa 80 °C sichtbar. Aufgrund des höheren Ausdehnungskoeffizienten des Leadframes im Vergleich zum Silizium kommt es zu einer konvexen Durchbiegung der Siliziumoberfläche und damit zu Zugspannungen in der empfindlichen Sensorschicht. Die Spannung  $\sigma_y$  beträgt bei 25 °C etwa 77 MPa. Vor dem Verpressen wird der Aufbau auf 180 °C erwärmt. Dies führt zu einer Druckspannung in der oberen Siliziumschicht von etwa -20 MPa. Da dieser Vorgang sehr schnell vonstatten geht, kommt es nur zu einer sehr geringen Relaxation des Klebers. Im anschließenden Abkühlschritt übt die Pressmasse sehr hohe Druckspannungen auf den gesamten Aufbau aus. Die Spannungen steigen bis auf ca. -75 MPa an.

Weiterhin wird der Vergleich zwischen linear-elastischer und viskoelastischer Modellierung der Pressmasse dargestellt. Aufgrund des Relaxationsverhaltens der Pressmasse sind die mechanischen Spannungen im viskoelastischen Fall geringer als im linear-elastischen Fall. Deutlich zu erkennen ist im viskoelastischen Fall eine Veränderung der mechanischen Spannung über der Zeit bei konstanter Temperatur (Bild 4, 3). Der Betrag der mechanischen Spannung nimmt über der Zeit zu. Dieses Verhalten resultiert aus mechanischen Spannungen aufgrund der unterschiedlichen Ausdehnungskoeffizienten von Leadframe und Silizium sowie des Relaxationsverhaltens der Pressmasse, [8]. Während des Galvanikschrittes sowie während des Endtests ist qualitativ das gleiche Verhalten zu erkennen. Die mechanischen

Spannungen in der Ebene  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$  und  $\sigma_{xy}$  zeigen qualitativ den gleichen Verlauf. Die Spannung  $\sigma_x$  liegt ca. 20 % über den Werten der Spannung  $\sigma_y$ , die Scherspannung erreicht Werte von maximal 15 MPa. Mechanische Spannungen in z-Richtung sind vernachlässigbar gering.

Wird zusätzlich eine lineare Schwindung von 0,2 % der Pressmasse in der Simulation berücksichtigt, so steigen die Werte der mechanischen Spannungen um 15 %, [7].

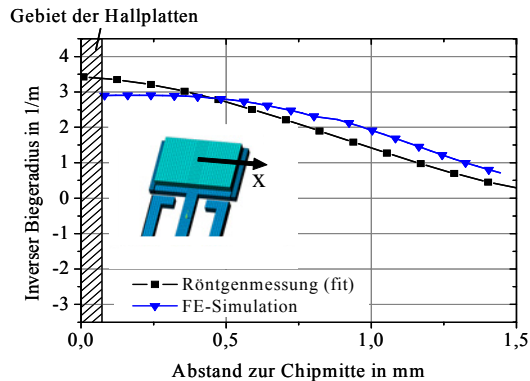


**Bild 4:** Simulierte mechanische Spannung in der obersten Siliziumschicht während des AVT-Prozesses  
1. Nach Kleber Aushärten; 2. Verpressen;  
3. Pressmasse Aushärten; 4. Galvanik; 5. Endtest

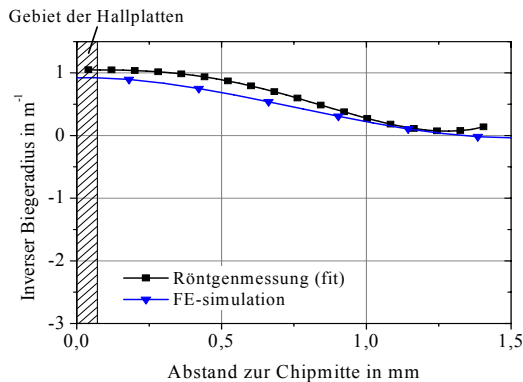
## 5. Messung der Verformung während des AVT-Prozesses

Zur Verifikation der Simulationsergebnisse wurde der Biegeradius der Siliziumoberfläche mittels Röntgen-Verformungsmessung bei 25 °C ermittelt, [8]. Die Messungen wurden im Institut Fresenius in Dresden durchgeführt. Vergleichend wurden die Siliziumoberflächen der Sensorchips vor dem Klebeprozess, nach dem Kleben und Aushärten sowie nach dem Verkleben und Verpressen untersucht. Bei den Sensorchips konnte keine Durchbiegung gemessen werden. Da für einen Schichtverbund der inverse Biegeradius proportional zur mechanischen Spannung ist, wird in Bild 5 der inverse Biegeradius des aufgeklebten Sensorchips bei 25 °C dargestellt. Demnach ergibt sich in Chipmitte ein maximaler Biegeradius von ca.  $3 \text{ m}^{-1}$ , dies entspricht einer mechanischen Spannung von ca.

76 MPa. Der inverse Biegeradius des Sensorchips im gehäusten Bauelement ist deutlich geringer als der des aufgeklebten Sensorchips, Bild 6. Hierbei liegt der inverse Biegeradius in Chipmitte bei  $1 \text{ m}^{-1}$ . Die höhere mechanische Spannung nach dem Verpressen der Sensoren resultiert aus der Kompression der umgebenden Pressmasse. Diese führt nicht zu einer Erhöhung des inversen Biegeradius. In beiden Fällen nimmt der inverse Biegeradius zum Rand hin annähernd linear ab. Die Simulation sowie die Messung zeigen in beiden Fällen eine gute Übereinstimmung.



**Bild 5:** Gemessener und simulierter inverser Biegeradius des aufgeklebten, unverpressten Siliziumchips bei  $25 \text{ }^\circ\text{C}$



**Bild 6:** Gemessener und simulierter inverser Biegeradius des verpressten Bauelementes bei  $25 \text{ }^\circ\text{C}$

## Schlussfolgerungen

Die durchgeführten Messungen demonstrieren die starke Abhängigkeit der magnetischen Empfindlichkeit der Hallsensoren von mechanischer Spannung. Durchgeführte und verifizierte Simulationen zeigen sehr hohe thermisch induzierte Zug- und Druckspannungen im Sensoraufbau während des AVT-Prozesses von bis zu 100 MPa. Nach dem Verpressen des Bauelementes hat die durch die Pressmasse verursachte Druckspannung entscheidenden Einfluss auf das Gehäuse.

Die nichtlinearen Materialeigenschaften führen zu signifikanten Veränderungen der mechanischen Spannungen in der empfindlichen Sensorschicht und müssen für eine korrekte Modellierung des Bauteils berücksichtigt werden. Da die magnetische Empfindlichkeit von den Spannungskomponenten  $\sigma_x$  und  $\sigma_y$  abhängt, können die thermisch induzierten mechanischen Spannung während des AVT-Prozesses Empfindlichkeitsänderung von ca. 5% bewirken.

## 6. Danksagung

Diese Veröffentlichung enthält Ergebnisse des vom BMBF geförderten Projekte „SIMOD – Modell-Baukasten für die Simulation modularer Mikrosysteme“ mit dem Förderkennzeichen 16SV1675. Für diese Förderung bedanken sich die Verfasser.

## 7. Literatur

- [1] Y. Kanda, K. Suzuki: The Piezo-Hall effect in n-silicon, 22<sup>nd</sup> International Conference on the Physics of Semiconductors, Vol. 1, 1995, S. 89-92
- [2] Z. Qian, M. Lu, S. Liu: Visco-elastic-plastic behaviors of polymer-based packaging materials, Proc. Of the 3rd International Conference on Adhesive Joining and Coating, IEEE 1998, S. 62-67
- [3] G. Wisse, K. M. B. Jansen, L. J. Ernst, M. S. Kiasat: time dependent behavior of molding compound in packaging, 13th European Microelectronics and Packaging Conference & Exhibition, Strassbourg, IMAPS 2001
- [4] S. Fischer, J. Wilde, E. Deier, E. Zukowski: Influence of materials data on the performance modelling in the design of MEMS Packages, Symposium on Advanced Packaging, IEEE, 2004
- [5] J. Wilde und E. Deier: Thermomechanische Einflüsse der Chipklebung auf die Genauigkeit mikro-mechanischer Drucksensoren, Teil 1: Simulation, Technisches Messen 70 H. 5, 2003, S. 251-257
- [6] S. Fischer, H. Beyer, R. Janke, J. Wilde, The influence of package-induced stresses on moulded Hall sensors, MST Technologies, DOI: 10.1007/s00542-005-0019-5, 2005
- [7] S. Fischer, H. Beyer, J. Wilde, R. Janke: Modellierung der Aufbau- und Verbindungstechnik am Beispiel des Backend-Prozesses gemoldeter Hallsensoren, 10. GMM Workshop, Cottbus, 2004, S. 231-238
- [8] S. Fischer, H. Beyer, R. Janke, S. Hartwig, J. Wilde: Comparison of analysis methods for package-induced stresses on moulded Hall sensors, Symp. on Design, Test, Integration of MEMS/MOEMS, Montreux, 2005, S. 239-243